



TASARE FOARTE REDUSĂ A SOLULUI GRANULAR LA SĂPAREA CU TBM A METROULUI BUCUREȘTI

Valentin ȘUGAR, Mario MASCI

VERY LOW GROUND SETTLEMENT IN TBM TUNNELLING IN GRANULAR SOIL AT THE BUCHAREST METRO LINE 4

The second stage of the Bucharest Metro extension started with the metro tunnel excavation presented in this paper, the M4 line. Tunnels in soft ground usually imply drilling through sub-surface un-lithified deposits, namely cohesive/non-cohesive/mixed soils that involve soft ground tunneling conditions where the tunnel is driven using a closed shield as temporary ground support. This must be followed by immediate involvement of tunnel lining due to considerable potential of ground movement during excavation, realized using a high mechanization level of the process. The Bucharest soil grain size distribution and the rest of the soil geotechnical parameters was the main factor to deal with. The water table also played a major role in determining the TBM type used, presenting further influences on the stability of the excavation face, with the option of dewatering the drilling site soil enhancing the TBM circumstances.

The chosen EPB type of TBM handled the geological variations that occurred at the excavation face (e.g. voids) due to the non-compressive medium which fills the working chamber at the TBM front and responds instantly and efficiently at the combined activity of hydraulic jacks thrust pressure; advance speed; cutter head torque and revolution speed; mucking screw speed which were controlled via a complex software and proper manning to set a constant value to the drilling head and TBM shield to achieve the smoothest and fastest advance of the boring machine. Using a soil conditioner that presented an up-graded formula rendered to the excavated soil considerably improved parameters. Moreover, the high degree of mechanization and automation of the excavation activity with TBM has decreased the high level of soil settlement and excavation face failure risk, resulting a very low ground settlement value for the project.

Keywords: tunnel, TBM (Tunnel Boring Machine), granular soil, settlement
Cuvinte cheie: tunel, TBM (mașina de frezat tuneluri), sol granular, tasare

1. Introducere

Tunelurile pentru rețeaua de metrou din București au început să fie construite din anul 1975, pentru prima magistrală și parte din cea de-a doua construite atunci folosindu-se metoda de execuție în săpătură deschisă - prin decopertarea carosabilului. Aceasta implica dezavantaje ca:

- consum ridicat de energie, de forță de muncă și de timp datorită necesității mutării unor cantități impresionante de sol prin decopertare și reacoperire a tunelurilor;
- desfășurare de șantier mult mai extinsă decât în cazul săpării clasice de tunel, implicând închiderea totală a zonei excavate pentru circulația publică;
- expunere la capriciile climaterice (inundații, îngheț).

Ca urmare, câțiva ani mai târziu s-a trecut de la săpături deschise la o tehnologie de execuție în subteran a tunelurilor de metrou, prin folosirea de scuturi cu front deschis de excavare, proiectate și executate în țara. Acestea aveau rol de susținere a solului granular existent în București prin protejarea feței de înaintare în timpul săpării manuale a tunelurilor, oprind ruperea de cădere a structurii nisipoase ce forma traseul proiectat al magistralelor de metrou [1]. Ca urmare, soluția finală folosită implica montarea segmentelor prefabricate de tunel în paralel cu înaintarea în etape a scutului de protecție, metodă ce stă și astăzi la baza principiului de funcționare a oricărui TBM (Tunnel Boring Machine) pentru sol lutos sau granular oriunde în lume.

Unele avantaje ale execuției tunelurilor de utilitate publică în marile metropole ar fi îmbunătățirea infrastructurii locale, evitarea exproprierilor sau reducerea volumului șantierului de execuție și a numărului utilităților afectate de la suprafață, cu cel mai mare avantaj fiind siguranța ridicată la care s-a ajuns astăzi și a valorilor foarte reduse de tasare generată a suprafeței solului. Acest major avantaj permite frezarea de tuneluri printr-o mare diversitate de soluri instabile, ca în cazul de câmpie aluvionară a Bucureștiului.

2. Alegerea tehnicii de excavare ideale pentru tipul de sol din București

Solul din București prezintă heterogenități orizontale proeminente combinate cu variații verticale semnificative de grosime de-a lungul primilor 300 m sub suprafață, unde solul este nisipos și argilos și conține o alternanță de trei straturi acvifere principale. Această situație conferă un statut hidrogeologic complex de care a

trebuie să se țină cont la alegerea tipului de TBM cu scut metalic pentru frezarea porțiunii finale a magistralei M4 din București, și anume dintre stațiile Parc Bazilescu și Străulești.

Forările de determinare a geologiei solului pentru această porțiune au scos în evidență existența unei stratificări de argile prăfoase, argile nisipoase și prafuri argiloase până la adâncimea de 20 m. Mijlocul acestei porțiuni prezenta o inserție de nisip prăfos, nisip cu pietriș și nisip prăfos argilos, caracterizată de o mare conductivitate hidraulică, care era generată de existența acviferului Colentina, prezent între râurile Colentina și Dâmbovița. Ca urmare, s-a determinat că traseul tunelurilor de metrou (de diametru de 6,6 m și prezentate în figura 1) să parcurgă această stratificare de sol granular ce se putea excava cu unul din cele două tipuri de mașini de frezat tip TBM potrivite acestui tip de sol: ce folosesc soluții bentonitice – numit SS (Slurry Shield), sau ce folosesc echilibrarea presiunii frontului de excavare generat la frezarea solului – numit EPB (Earth Pressure Balance) [2].

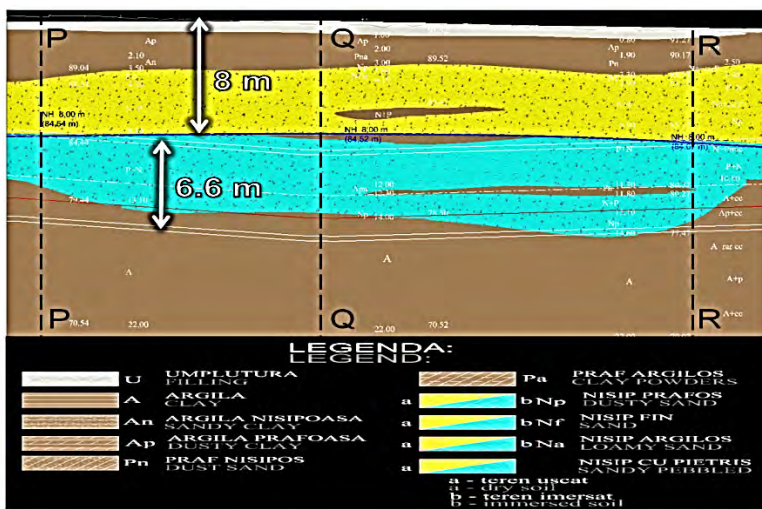


Fig. 1 Geologia stratificării solului pentru magistrala M4

Reologia stratului acvifer Colentina prezenta, ca primă opțiune, caracteristicile necesare alegerii unui TBM tip SS, care ar fi scăzut prin intermediul soluției bentonitice injectate la fața de excavare efectul abrazivității granulelor de sol. Totuși, aceasta soluție bentonitică ar fi generat necesitatea creării unei instalații complexe de filtrare și recirculare a bentonitei în sistemul de frezare și, în plus, o pre-măcinare a granulelor solului excavat pentru a putea fi pompate afară din tunel ca și steril, ceea ce ridică foarte mult costul excavării. În plus, presiunea și debitul variabil al acviferului existent în secțiunea de sol ce urma să fie

frezată ar fi influențat negativ funcționarea mașinii de frezat tip EPB, care, pentru săpat tuneluri în sol cu pânza freatică joasă sau fără pânză freatică, este mai potrivită decât mașina TBM de tip SS [3]. Ca urmare, s-a hotărât coborârea pânzei locale freatice prin forarea de puțuri de epuismenț pânã sub nivelul de execuție proiectat a tunelurilor de metrou pe toată lungimea de completare a magistralei M4.

Primul mare avantaj al asanării acestei porțiuni a fost obținerea unei presiuni a apei din sol egală cu zero, ceea ce scãdea valoarea de proiectare a presiunii feței de excavare a frezei tip EPB și, astfel, aceasta putea fi balansată mult mai efectiv. Al doilea avantaj major a fost cã, în lipsa variației de debit în pânză freatică, agentul spumant folosit de-a lungul procesului de frezare cu TBM activa mai controlat și mai eficient în direcția creșterii parametrilor reologici a solului supus excavării [2]. Ca atare, varianta aleasă pentru magistrala 4, prezentată în figura 2, a fost frezarea cu un TBM tip EPB.

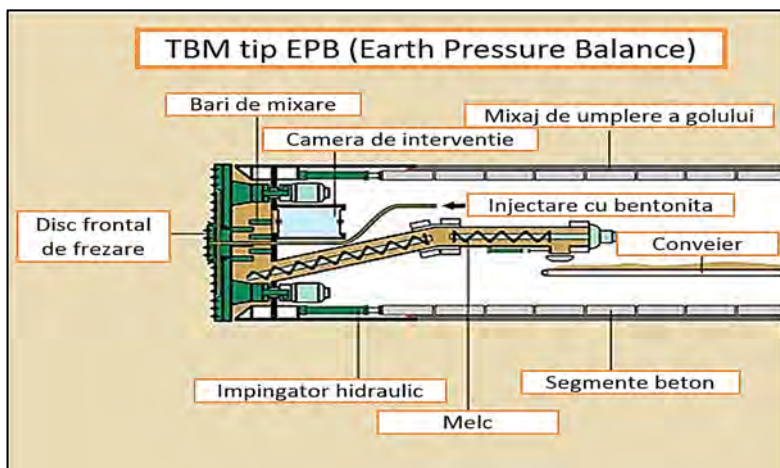


Fig. 2 Secțiune longitudinală a unui TBM tip EPB

Tasarea suprafeței solului în cazul săpării de tuneluri cu TBM, prezentată în figura 3, ia forma unei curbe de distribuție Gaussiană ce se poate obține bazat pe variate metode empirice, definite și cizelate de experiența din ultimele decenii de excavare cu freze TBM. Determinarea, în faza de proiectare a excavării, a valorii de tasare a solului în cazul metroului din București a fost făcută prin metoda Burland [4], ce dovedește cã, datorită caracterului modular al peretelui tunelului și a frezării asistate de programe speciale de computer (ce generează suficientă cantitate de date pentru a împiedica tasarea solului în termen mediu și îndelungat), doar tasarea imediată a excavării subterane a tunelului se ia în considerare pentru calculele de proiect.

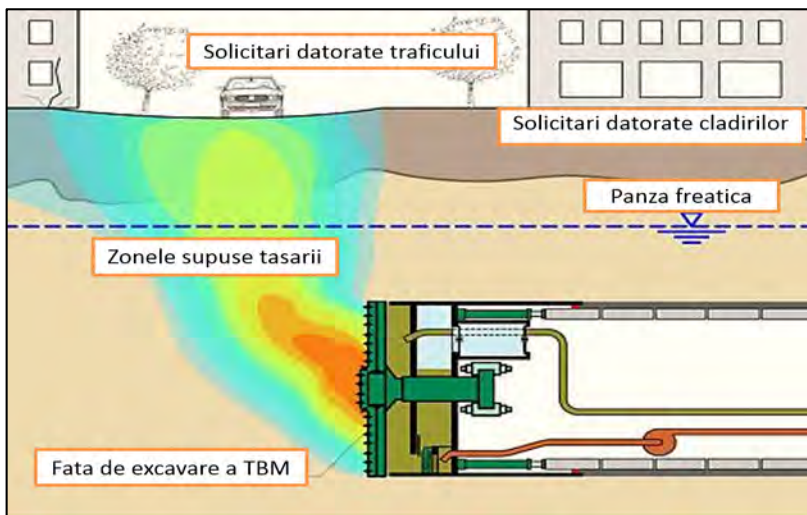


Fig. 3 Mecanismul de tasare a solului la frezarea de tuneluri cu TBM

Ca urmare, valoarea tasării suprafeței solului determinate prin metoda Burland [4] în faza de proiectare a săpării celor două tuneluri (de sens și de contrasens) a porțiunii Parc Bazilescu – Străulești a reieșit, după cum se poate vedea în figura 4 - stânga, ca fiind între 8,4 mm și 10 mm. Validarea acestei valori de determinare empirică a tasării a fost obținută prin intermediul programului geotehnic de computer Plaxis, ce analizează deformarea și, ulterior, stabilitatea post execuție a structurii solului și a tunelurilor folosind Metoda Elementelor Finite, ce este bazată pe calcule numerice complexe ce stimulează geometrii complete a stresurilor generate de frezare și efectele lor asupra structurii tunelurilor modulare. Astfel, parametrii proiectați ai tunelurilor au fost introduși împreună cu datele rezultate din forarea geo-tehnica inițială a solului și din care, după procesare, au rezultat profilele de tasare materializate în curba prezentată în figura 4 - dreapta. Aceasta a fost suprapusă peste profilul de tasare obținut prin metoda empirică clasică Burland amintită mai sus, permițând să se evidențieze aceiași valoare de tasare de 8 – 10 mm.

3. Îmbunătățirea condițiilor de sol înaintea și în timpul frezării cu TBM

Datorită absenței clădirilor masive din vecinătatea traseului de săpare a tunelurilor de metrou, și mai ales că șoseaua ce se întindea la

suprafața solului pe toată lungimea proiectului prezenta suficientă lățime pentru a se forța numărul necesar de epuizante pentru o eficientă coborâre a pânzei freactice, s-au forat 92 de puțuri dispersate pe trei rânduri paralele. Puțurile au fost dotate cu tuburi, perforate de-a lungul grosimii stratului de sol granular ce urma să fie frezat cu TBM pentru a colecta și în același timp a filtra apa din acviferul Colentina - caracterizat de o permeabilitate de 50-250 m/zi. Pentru o asanare eficientă, puțurile au fost denisipate regulat, astfel încât în prima fază cele 14 pompe de extracție ale apei freactice au realizat un debit de 6-7 l/s, iar în faza ulterioară de menținere a nivelului freatic proiectat scăzut, s-a ajuns la o medie de 3-4 l/s.

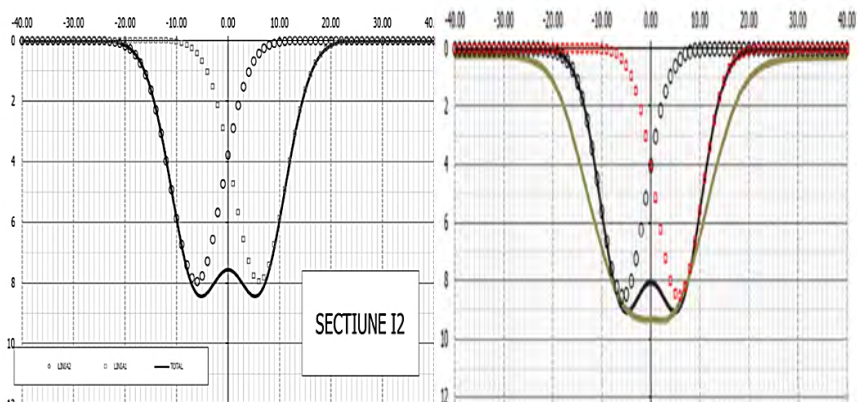


Fig. 4 Tasarea obținută prin metoda Burland (stânga) și Plaxis (dreapta - maro)

Pentru că, în general, solurile cleioase și nisipoase prezintă în-situ doar o fracțiune din caracteristicile ideale necesare unui TBM pentru o frezare continuă eficientă, acestea trebuie tratate cu agenți spumânți sau polimeri de structură complexă, mai ales în cazul în care, ca în București, solul conține un procentaj mai ridicat de nisip și pietriș, comparat cu un sol pur cleios [2]. În cazul magistralei M4, în care structura solului nu a fost omogenă de-a lungul traseului subteran excavat, prezentând variații semnificative de coeziune a particulelor și a unghiului lor de frecare, a fost necesară o determinare clară a celei mai de randament opțiuni de agent spumant, ce are rolul de a transfera suficientă plasticitate și fluiditate pentru ca presiunea necesară excavării să fie transferate eficient și instant din camera de recuperare a sterilului de la partea anterioară a TBM-ului și, astfel, fața de excavare a tunelului să fie continuu susținută și menținută în poziție.

Ca urmare, probe de sol deja asanat (rezultat ca fiind constituite din 85 % nisipuri și pietriș, 15 % sol cleios, zero coeziune între particule și 8,2 % apă) au fost supuse determinării plasticității și fluidității medii prin analizarea momentului de torsiune, plasticității, permeabilității și penetrării, doi dintre aceștia fiind prezentați în figura 5. În consecință, s-a obținut o formulă de agent de spumare ce, prin combinarea reducerii de presiune a apei asupra porilor solului, obținută prin asanare, cu lubrifierea ridicată a acestor pori, a determinat o impresionantă diminuare a momentului de torsiune necesar frezării solului cu 90 % (figura 5 - stânga), iar permeabilitatea a scăzut de la $2,64 \times 10^{-4}$ la $1,08 \times 10^{-7}$ (figura 5 - dreapta – prezentată negativ), conformându-se astfel cerințelor de funcționare a unui TBM [5].

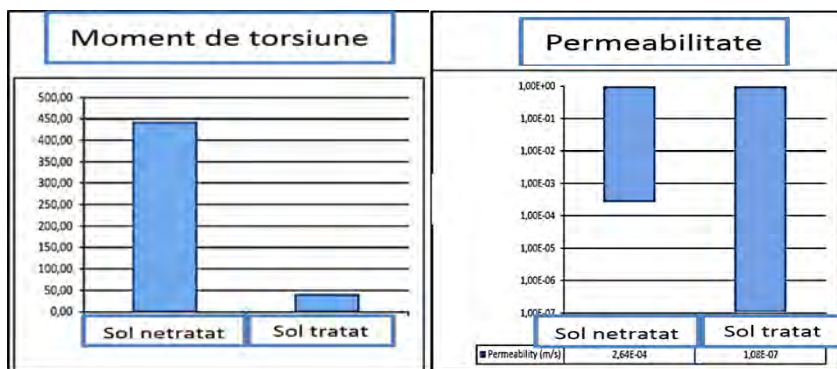


Fig. 5 Momentele de torsiune și permeabilitățile obținute pentru sol netratat și tratat

Prin procesul de săpare a solului cu TBM se creează un tunel cu diametru puțin mai mare decât profilul ușor conic al frezei, rezultând astfel un spațiu cilindric gol ce se formează între extrasolul structurii circulare de segmente prefabricate și solul neexcavat rămas in-situ. Acest gol trebuia umplut cât de repede posibil cu un material ce trebuie să mimeze perfect caracteristicile și proprietățile fizice ale solului excavat. În cazul magistralei 4 din București a fost folosit un mixaj format din ciment, apă, o soluție bentonitică biodegradabilă pentru gresare și două componente ce au lucrat consecutiv – întârziator, pentru faza de injectare, și accelerator, pentru faza de întărire post-injecție. Acest mixaj a prezentat un timp de întărire de 5 secunde, ce necesita, după fiecare ciclu, spălarea sistemului de injectare cu apă la foarte înalta presiune (70 bar), și, mai mult, o scurgere de apă după întărire de doar 1,1%. Datorită timpului extrem de scurt de coagulare, presiunile și debitele de injectare ale acestui amestec au fost asistate

de un program complex de computer pentru a putea respecta în totalitate graficul de injectare proiectat și apoi controlat de rețeaua de senzori plasați în zona de frezare a mașinii.

4. Interconectivitățile fazelor de lucru din cadrul procesului de frezare asistate de computer cu TBM la magistrala M4

Tehnica de excavare folosită fiind EPB, a fost necesară în primul rând o măsurare a presiunilor de lucru din zona de frezare prin intermediul a 6 senzori distribuiți simetric pe discul frontal de săpare a TBM-ului. Bazat pe aceste date, computerul de bord genera și readapta parametrii pentru următoarele comenzi:

- presiunea de avans, efectuată prin împingerea hidraulică a mașinii;
- viteza de excavare a TBM-ului;
- momentul de torsiune și viteza radială a discului frontal de săpare;
- viteza melcului de extracție a solului excavat.

Partea frontală a mașinii formează un spațiu închis ermetic pentru a se putea echilibra presiunea feței de excavare prin contracararea variațiilor de presiune din acea zonă cu ajutorul unor presiuni egale dar de semn opus, create în melcul de extragere a solului și a cărui înveliș exterior este inclus în volumul ermetizat. Astfel, prin modificarea turației melcului se creează presiunea comandată de computerul central la momentul respectiv, ce este calculată în funcție de parametrii citiți la gama de senzori existenți pe TBM.

Tubulatura tunelului fiind creată modular din segmente de beton prefabricat, distribuirea lor în poziție s-a făcut cu un braț hidraulic robotizat cu marja de eroare foarte scăzută, folosindu-se modelul de așezare prin care să nu apară îmbinări aliniate pe lungimea completă a tunelului. Direcționarea frezării s-a pus în practică prin sistemul ultra performant de orientare cu laser Poltinger Precision System, ce determina automat direcția excavării, poziția exactă de avans a feței închise de frezare și deviațiile orizontale/verticale prin măsurarea ciclică cu teodolit motorizat a prismelor de monitorizare poziționate pe TBM și raportate la prisma de referință cu coordonate fixe, toate acestea creând un model în sistem 3D.

Mixajul de umplere a golului rămas imediat după frezarea tunelului, și care s-a injectat pentru recrearea exactă a condițiilor geotehnice dinaintea frezării, putea să genereze sau țasare, în cazul în care presiunea de injectare era prea mică, sau umflare a solului, în cazul în care această presiune era prea mare, mai ales că tunelurile magistralei M4 s-au săpat la o medie de doar 8 m (figura 1) sub nivelul solului. Valorile optime ale presiunii de injectare a mixajului au fost determinate de computerul central în funcție de suma parametrilor

existenți la fiecare ciclu de creare a unui modul de inel de tunel. Pentru a putea rezulta o tasare medie minimă pe întregul proiect, a fost necesară menținerea coordonării interconectivității între fazele prezentate mai sus de-a lungul fiecărui ciclu de montare a inelelor modulare a fiecărui tunel.

5. Tasarea rezultată la suprafață după frezarea tunelurilor cu TBM

Tasările de la suprafața traseului magistralei M4 au fost monitorizate conform metodei de determinare din [6] a elevației unei rețele de puncte fixe, poziționate sistematic la distanțe de 25 m axial și perpendicular pe traseele excavate ale tunelurilor. Citirea nivelurilor geodezice s-a făcut cu o nivelă digitală Leica DNA03, care prin programul propriu Leica Survey Office permitea să se stocheze valori sub deviații standard de 0,3 mm pe km, raportate la marcări de bază insertizate și fixate cu adeziv în fundațiile cele mai masive ale clădirilor adiacente traseului excavat.

Din exemplul de măsurători ale tasărilor din figura 6, unde se poate vedea că toate valorile determinate nu depășesc 2 mm, medie obținută pe toată lungimea de excavare a magistralei 4 și care a rezultat ca fiind de patru ori mai mică decât tasarea maximă proiectată de 10 mm, prezentată mai sus în aceasta lucrare. În tabelul de mai jos, valorile negative reprezintă situația de umflare a solului, observându-se că și aici se regăsește același rezultat de frezare cu TBM cu efect foarte redus de tasare in-situ a solului excavat.

6. Concluzii

- Presiunea de lucru a TBM-ului în zona de frezare variază în general datorită modificărilor de geologie in-situ față de cele proiectate pe baza forărilor de-a lungul traseului excavat și, în același timp, datorită fluctuației pânzei freatice. Pentru că în acest caz s-a efectuat asanarea în prealabil a zonei de frezare, riscul apariției tasărilor s-a înjumătățit.

- Toate operațiunile asistate de computer sau fost centralizate, analizate și corectate, dacă este cazul, la pupitrul de comanda al TBM-ului poziționat în zona anterioară a acestuia, permițând luarea de măsuri instantanee în caz de abatere de la parametrii de execuție, scăzând și mai mult riscul de apariție de tasări.

- Sistemul tridimensional de orientare cu laser determină segmentele prefabricate de tunel să fie poziționate ideal printr-o secvențialitate optimizată continuu, împiedicând situații de poziționare

defectuoasă a elementelor tubulare sau generarea de vibrații nedorite de re poziționare, minimalizând mai departe riscul de tasare a solului și rezultând într-o valoare de tasare in-situ a suprafeței solului de sub 2 mm, cu 75 % mai mică decât cea proiectată.

Fisa nr. 1-L / Pag. 7 / 23.04.2015

SECTIUNE LONGITUDINALA Nr.		Unia 1	
LIMITE ALERTA (mm)		10	
LIMITE ALARMA (mm)		15	

SECTIUNE	REPER	COTA	CITIREA „0”		CITIREA „4”		CITIREA „5”			
			Data:	Temp:	Data:	Temp:	Data:	Temp:		
			07.04.15	10°C	22.04.15	15°C	23.04.15	17°C		
			Km TBM:	Km TBM:	Km TBM:	Km TBM:	Km TBM:	Km TBM:		
			6+995,447	6+987,947	6+986,547					
			Δ abs m	Δ rel m	Δ abs m	Δ rel m	Δ abs m	Δ rel m		
RT	188	92,8888			92,8876	0,0011	0,0007	92,8879	0,0008	-0,0003
RT	189	92,8402			92,8398	0,0004	0,0004	92,8405	-0,0003	-0,0007
RT	190	92,7996			92,7991	0,0005	0,0003	92,7997	-0,0001	-0,0006
RT	191	92,7884			92,7882	0,0002	0,0004	92,7889	-0,0005	-0,0007
SGT01	TL7	92,7875			92,7874	0,0001	0,0002	92,7881	-0,0006	-0,0007
RT	1	92,7935			92,7935	0,0000	0,0003	92,7943	-0,0008	-0,0008
RT	2	92,7993			92,7994	-0,0001	0,0004	92,8003	-0,0010	-0,0009
RT	3	92,7898			92,7898	-0,0001	0,0002	92,7902	-0,0005	-0,0004
RT	4	92,7744			92,7741	0,0002	0,0002	92,7744	-0,0001	-0,0003
SGT02	TL7	92,7672			92,7662	0,0010	0,0002	92,7666	0,0006	-0,0004
RT	5	92,7577			92,7572	0,0005	0,0004	92,7577	0,0000	0,0005
RT	6	92,7594						92,7596	0,0002	

Fig. 6 Valori de monitorizare a tasărilor la magistrala M4

BIBLIOGRAFIE

- [1] Iordănescu, D., Georgescu, C., *Construcții pentru transporturi în România*, Editura CCCF, București, 1986.
- [2] Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., Wehrmeyer, G., *Mechanised Shield Tunnelling, 2nd Edition*, Editura Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 2012.
- [3] Guglielmeti, V., Grasso, P., Mahtab, A. and Xu, S., *Mechanized Tunnelling in Urban Areas*, Editura Taylor & Francis Group, London, UK, 2008.
- [4] Burland, J.B., *Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation*, Earthquake Geotechnical Engineering, Editura Balkema, Rotterdam, 1997.
- [5] Milligan, G., *Lubrication and Soil Conditioning in Tunnelling, Pipe Jacking and Microtunnelling* [online]. Disponibil la: <http://www.eng.ox.ac.uk/geotech/research/pipejack/reports/soilcond.pdf>, 2000.
- [6] Oprescu, N., Albota, M., Atudorei, M., Balea, V., *Manualul Inginerului Geodez*, Editura Tehnică, București, 1973, Volumul 3, pag. 104-112.

Valentin ȘUGAR, masterand la Camborne School of Mines,
 membru AGIR, e-mail: ns383@exeter.ac.uk
 Mario MASCI, TBM&Tunnel Manager, Astaldi
 e-mail: M.Masci@astaldi.com